



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANNA SAARENHOVI  
TERMISEN AURINKOENERGIAN VARASTOINTIMENETELMÄT  
Kandidaatintyö

Kemian ja biotekniikan laboratorio

Tarkastaja: Seppo Syrjälä

## TIIVISTELMÄ

**ANNA SAARENHOVI:** Termisen aurinkoenergian varastointimenetelmät

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 24 sivua

Toukokuu 2018

Tekniikan ja luonnontieteiden kandidaatin tutkinto-ohjelma, Ympäristö- ja energiatekniikka

Pääaine: Energia- ja prosessitekniikka

Tarkastaja: Seppo Syrjälä

**Avainsanat:** Aurinkoenergia, lämpöenergia, varastointimenetelmä

Tämä kandidaatintyö keskittyy uusiutuvan energiamuodon, termisen aurinkoenergian, eri varastointimenetelmiin. Tutkimuksen päätutkimuskysymyksenä toimii ”Miten termistä aurinkoenergiaa voidaan varastoida talteen?”

Terminen aurinkoenergia jakautuu epätasaisesti maapallolle ja sitä on saatavilla vain tietynä vuorokaudenaikana. Tämän vuoksi on tärkeää, että auringon säteilemää lämpöenergiaa kerätään talteen hetkiä varten, jolloin sitä ei saatavilla ole. Termisen aurinkoenergian varastointia on ihmiskunta hyödyntänyt jo vuosisatoja. Kuitenkin viimeisimpien kymmenien vuosien aikana uuden teknologian ansiosta on pystytty kehittää uusia ja edistyneempiä varastointimenetelmiä, joita tutkimuksessa myös käydään läpi.

Tutkimuksessa perehdytään lämpötilaerovarastointiin ja latenttilämpövarastointiin. Varastointimenetelmien yhteydessä tutkitaan sovelluksia, joihin menetelmiä ollaan hyödynnetty sekä materiaaleja, joita prosesseissa käytetään. Lisäksi tutkimuksessa vertaillaan menetelmiä keskenään.

Tutkimustuloksena työssä pohdittiin menetelmien soveltuvuutta Suomen ilmasto-oloihin ja päädyttiin seuraavaan tulokseen: Termisen aurinkoenergian varastointimenetelmiä on mahdollista hyödyntää myös Suomessa, vaikka aurinkoenergiaa ei ole yhtä paljon saatavilla kuin eteläisemmässä Euroopassa. Suomalaisen ihmisen hiilijalanjälki on perinteisesti suuri, joten uusiutuvan energian käyttö rakennusten lämmityksessä on tulevaisuuden kannalta elintärkeää.

## ALKUSANAT

Tämä tutkimus on kandidaatintyö Tampereen teknilliselle yliopistolle ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelmassa. Tutkimuksessa selvitetään yleisimpiä varastointimenetelmiä termiselle aurinkoenergialle. Kiinnostukseni suomalaisiin cleantech-yrityksiin synnytti halun tehdä tarkempaa tutkimusta uusiutuvasta energiasta. Aiheeksi valikoitui-kin uusiutuvan energian varastointi, tarkemmin termisen aurinkoenergian varastointi, ja tavoitteenani on valmistuttuani päästä luomaan uraani aiheen parissa.

Haluan erityisesti kiittää kummisetääni Jyri Arposta ja isääni Topi Saarenhovia, jotka innoittivat minua tutkimaan uusiutuvia energiamuotoja kandidaatintyössäni ja herättivät kiinnostukseni puhdasta teknologiaa kohtaan. Lisäksi haluan kiittää ohjaajaani Seppo Syrjälää aiheen muokkaamisessa ja hiomisessa tutkimuskelpoiseksi sekä äitiäni Maria Saarenhovia tuesta ja palautteesta. Sydämelliset kiitokset myös sisaruksilleni, Jaakko Varjoselle sekä muille läheisilleni, jotka ovat tulevaa diplomi-insinöörin uraani ja muita pyrkimyksiäni aina tukeneet.

Tampereella, 29.5.2018

Anna Saarenhovi

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	YLEISKATSAUS AURINKOENERGIAN VARASTOINTIIN.....	2
2.1	Termisen energian varastointi yleisesti.....	2
2.1.1	Termisen energian varastointimateriaalien tarkasteltavat ominaisuudet .....	3
3.	LÄMPÖTILAEROVARASTOINTI.....	4
3.1	Lämpötilaerovarastoinnissa käytettävät materiaalit .....	4
3.1.1	Nestemäiset lämpötilaerovarastoinnissa käytettävät materiaalit .....	5
3.1.2	Kiinteät lämpötilaerovarastoinnissa käytettävät materiaalit.....	6
3.2	Lämpötilaerovarastointi matalissa lämpötiloissa .....	8
3.3	Lämpötilaerovarastointi korkeissa lämpötiloissa .....	8
3.4	Lämpötilaerovarastoinnin sovelluskohteita .....	9
3.4.1	Kahden tankin välinen suora aktiivinen systeemi.....	9
3.4.2	Yhden tankin termokliininen systeemi.....	10
3.4.3	Passiivinen kiintokerrossysteemi.....	11
3.4.4	Höyryakku .....	12
4.	LATENTTILÄMMÖN VARASTOINTI.....	13
4.1	Faasimuutosmateriaalien luokittelu .....	13
4.2	Latenttilämmön varastointi matalissa lämpötiloissa.....	15
4.3	Latenttilämmön varastointi korkeissa ja keskikorkeissa lämpötiloissa .....	15
4.4	Latenttilämpövarastoinnin sovelluskohteita.....	16
4.4.1	Faasimuutosmateriaalin kapselointi.....	16
4.4.2	Lämpöputki.....	17
4.4.3	Faasimuutosmateriaaliin upotetut huokoiset matriisit .....	17
4.4.4	Rivat ja laajennetut pinnat .....	17
5.	POHDINTA JA VERTAILU .....	18
6.	YHTEENVETO.....	21
	LÄHDELUETTELO.....	23

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

$Q$	lämpöenergia
$m$	massa
$C_p$	lämpökapasiteetti vakio paineessa
$T_L$	lämpötila, matala
$T_H$	lämpötila, korkea
$PCM$	<i>phase change material</i> , faasimuutosmateriaali
$HTF$	<i>heat transfer fluid</i> , lämmönsiirtoneste
$SHTES$	<i>sensible heat thermal energy storage</i> , lämpötilaerovarastointi
$LHTES$	<i>latent heat thermal energy storage</i> , latenttilämpövarastointi
$LCOE$	<i>levelized cost of energy</i> , kustannusten laskentamenetelmä

# 1. JOHDANTO

Uusiutuvien energiamuotojen hyödyntäminen ja kehittäminen ovat tällä hetkellä vahvasti esillä, kun puhutaan energiasta tai sen tuottamisesta. Erityisesti aurinkoenergia näyttää olevan lupaavin uusiutuvan energian muodoista. Aurinkoenergiaa on saatavilla joka puolella maapalloa ja sen pitäisi riittää tyydyttämään koko ihmiskunnan tarpeet. Kuitenkin tiedetään, että aurinkoenergia on hajautunut epätasaisesti pallollemme ja sitä on saatavissa vain jaksoittain vuorokauden- tai jopa vuodenajasta riippuen. [1] Tämän vuoksi on tärkeää, että kehitetään varastointimenetelmiä, joilla auringon säteilemää energiaa voidaan varastoida talteen niitä hetkiä varten, jolloin aurinkoenergiaa ei ole saatavilla. Aurinkoenergiaa on mahdollista kerätä talteen kahteen eri muotoon, sähköksi tai lämmöksi. [2] Tässä työssä keskitytään tutkimaan menetelmiä, joilla varastoidaan auringon säteilemää termistä energiaa eli lämpöenergiaa.

Työn tavoitteena on kartoittaa, minkälaisia yleisiä varastointimenetelmiä termiselle aurinkoenergialle on ja missä lämpötila-alueilla näitä hyödynnetään. Työssä pyritään vertailemaan valittuja varastointimenetelmiä käytettävyyden, hinnoittelun ja systeemien monimutkaisuuksien kautta. Työssä perehdytään kahteen yleisimpään ja eniten tutkittuun ja lopussa tehdään tiivis vertailu työssä läpikäydyistä menetelmistä.

Ensimmäiseksi työssä tarkastellaan yleisesti aurinkoenergian varastointia ja ominaisuuksia, joita varastointimateriaaleilla tulisi olla toimivan prosessin saavuttamiseksi olla. Työssä lämpöenergian varastointimenetelmät on jaettu matalien ja korkeiden lämpötilasteiden menetelmiin. Rajaava lämpötila-aste tässä tutkimuksessa on 200 celsiusastetta (°C) [3]. Luvussa kolme katsastetaan lämpötilaerovarastointia kahdesta eri näkökulmasta, varastointimenetelmiä matalissa ja korkeammissa lämpötiloissa sekä tehdään katsaus yleisimpiin varastointimateriaaleihin sekä sovelluksiin, joissa lämpötilaerovarastointia käytetään. Luvussa neljä tutkitaan latenttilämpövarastointia sekä korkeiden että matalien lämpötilojen kannalta, tehdään katsaus yleisimpiin latenttilämpöenergiaa eli faasimuutosmateriaaleihin sekä tutkitaan yleisimpiä sovelluskohteita latenttilämpövarastoinnille. Työn lopussa vertaillaan kahta tutkittua menetelmää ja pohditaan, mitkä varastointimenetelmät ja sovellukset näistä ovat kannattavia hyödyntää Suomen kaltaisissa leveyspiireissä niin saatavuuden, kustannuksien kuin systeemien monimutkaisuuksienkin kannalta.

## 2. YLEISKATSAUS AURINKOENERGIAN VARASTOINTIIN

Energiavarasto on systeemi, jonka tarkoituksena on säilöä tietyn tyyppistä energiamuotoa, joka voidaan myöhemmin hyödyntää käytössä, mikäli tarve sille ilmenee. Tavallisin energian varastointiin käytettävää laitetta kutsutaan akkumulaattoriksi eli akuksi. Hiljaisimman kuormituksen aikana generoitu energia täytyykin saada varastoitua niitä tunteja varten, milloin kysyntä energialle on suurinta. Tyypillisen päivän aikana kysyntä on pienintä neljän aikaan aamuyöstä, jolloin niin kotitalouksissa kuin teollisuudessaakin vietetään hiljaisinta aikaa. Vuorokauden ensimmäinen kysyntäpiikki on pian keskipäivän jälkeen, jolloin teollisuus vilkastuu päiväksi. Päivän toinen kysyntäpiikki ilmenee yhdeksän aikaan illasta, kun kotitalouksien energiatarve kasvaa hetkellisesti. Edellä mainittu kysyntä tulee siis vuorokauden aikana kattaa joko uusiutuvien tai uusiutumattomien energiavarojen. [1, 2]

On olemassa monia erilaisia tapoja luokitella eri varastointimenetelmiä aurinkoenergialle ja tärkeää on huomioida kaikkien eri varastointimenetelmien edut ja haittapuoleet. Aurinkon säteilemä energia jakautuu kahteen muotoon: fotosähköisten (*PV – photovoltaic*) paneelien kautta saatavaan sähköiseen energiaan sekä keskitetystä aurinkovoimasta syntyneeseen termiseen energiaan. [2] Tässä tutkimuksessa keskitytään termisen energian varastointiin ja tarkemmin rajattuna lämpövarastointiin.

### 2.1 Termisen energian varastointi yleisesti

Termisen energian varasto voidaan mahdollistaa viilentämällä, lämmittämällä, sulattamalla, jähmettämällä tai höyryttämällä valittua materiaalia. Energiaa siis joko varastoituu materiaaliin tai vapautuu siitä lämpötilan vaihdellessa materiaalisissa. Prosessin palautuvuus mahdollistaa sen, että energiaa voi vapautua lämpönä kuin myös sitoutua materiaaliin. Prosessin tehokkuus riippuu paljon valitun materiaalin ominaislämpökapasiteetista eli siitä, kuinka paljon käsiteltävä materiaali kykenee sitomaan itseensä energiaa, kun sen lämpötila nousee. Muita prosessin tehokkuuteen vaikuttavia seikkoja ovat valitun materiaalin määrä, eli sen massa ja tilavuus, sekä ympäristön olosuhteet prosessin tapahtuessa. [4]

Termisen energian varastoimiseksi ja kierrättämiseksi on välttämätöntä käyttää lämmönsiirtonestettä (*HTF – heat transfer fluid*) [5]. Lämmönsiirtäjänä voi prosessissa siis toimia joko itse varastointimateriaali tai erillinen neste/kaasu, joka kiertää varastointimateriaalin kuumen ja kylmän pään välillä siirtäen lämpöä. [3] Tavallisimpia lämmönsiirtonesteitä ovat kaasut, vesi nesteinä tai kaasuna, öljyt, termiset nesteet ja sulasuolat. Varastoinnissa käytettävä lämmönsiirtoneste määrittelee, minkä suuruisella lämpötila-asteikolla termistä

energiaa pysytään systeemissä keräämään ja siirtämään. Tämän vuoksi termisen energian varastointimenetelmät on jaettu lämpötila-asteikon mukaan matalien ja korkeiden lämpötilojen varastointimenetelmiin. Tyypillinen lämpötila-aste, joka jakaa nämä kaksi erilleen on 200 °C:tta. [5]

### **2.1.1 Termisen energian varastointimateriaalien tarkasteltavat ominaisuudet**

Materiaalivalinta termisen energian varastoinnissa riippuu paljon energian käyttötarkoituksesta ja siitä, mitä termisellä energialla halutaan lämmittää. Talojen lämmitys vaatii vain matalan lämpötilan termisen energian varastolla, kun taas sähköä voidaan generoida vain korkeissa lämpötiloissa, yli 175 °C:ssa, termisen energian varastoista. Termisen energian varastointimateriaaleissa tulisi ottaa huomioon ainakin materiaalien seuraavat ominaisuudet: sulamispiste, aineen tiheys, latenttilämpö aineessa, lämpökapasiteetti, lämmön johtavuus, aineen alijäähtyminen, hinta ja saatavuus, lämmönkestävyys, kemiallinen kestävyys, tilavuuden muutos lämpötilan muutoksissa, toksisuus, aineen korroosio, syttyvyys, erkautuminen sulaessa ja kaasun paine. [3, 5]

Yleisesti tarkasteltuna parhaalla mahdollisella varastointimateriaalilla tiheys on mahdollisimman pieni, mikä mahdollistaa suuremman energiamäärän varastoimisen pienempään määrään ainetta. Ideaalisesti ominaislämpökapasiteetin tulisi olla mahdollisimman suuri, sillä se kertoo materiaalin korkeasta lämmönsitomiskyvystä. Etuna on myös aineen korkea lämmönjohtavuus, jotta lämpö pääsee systeemissä virtaamaan mahdollisimman tehokkaasti ja nopeasti. Luonnollisesti materiaalin hinnan tulisi pysyä järkevänä. Edullinen materiaali vähentää systeemin operatiivisia kustannuksia. Varastointimateriaalissa käytettävää ainetta olisi hyvä olla myös paljon ja laajasti saatavilla. Lisäksi valitun aineen tulee kestää korroosiota ja sen lämmön kestävyys täytyy olla hyvä. [3]



### 3. LÄMPÖTILAEROVARASTOINTI

Lämpötilaerovarastointi (*SHTES – sensible heat thermal energy storage*) perustuu lämpöenergian keräämiseen kiinteään tai nestemäiseen väliaineeseen, jonka lämpötila nousee energiamäärän kasvaessa [5]. Väliaineen, johon energiaa sidotaan, lämpeneminen ja ominaisuus sitoa tietty lämpömäärä itseensä perustuu sen yksilölliseen lämpökapasiteettiin. [1] Kaavan (1) avulla voidaan kuvata aineeseen sitoutuva lämpöenergia

$$Q = m \int_{T_L}^{T_H} C_p dT = mC_p(T_H - T_L), \quad (1)$$

jossa  $Q$  on lämpöenergia,  $m$  tarkasteltavan aineen massa,  $C_p$  materiaalin ominaislämpökapasiteetti vakio paineessa ja erotus  $T_H - T_L$  kuvaa lämpötilan muutosta prosessissa. Kaavassa on oletettu ominaislämpökapasiteetin  $C_p$  olevan vakio. [5] Lämpötilaerovarastointia voidaan hyödyntää niin korkeissa kuin matalimmissakin lämpötiloissa. [1]

#### 3.1 Lämpötilaerovarastoinnissa käytettävät materiaalit

Lämpötilaerovarastoinnissa käytettävä materiaali varastoi lämpökapasiteettiinsa termistä energiaa. Kun faasimuutosta ei materiaalissa tapahdu, riippuu varastoitavan energian määrä siitä, kuinka suuri tiheys materiaalilla on, kuinka paljon materiaalia on varastointiin käytettävissä, mikä materiaalin ominaislämpökapasiteetti on ja lämpötilavälistä, jossa energiaa kerätään talteen. [3]

Lämpötilaerovarastoinnissa termistä energiaa voidaan kerätä talteen sekä nestemäisiin että kiinteisiin väliaineisiin. **Vesi** on yksi parhaimmista nestemäisistä varastointimateriaaleista, sillä se on edullista ja sen lämpökapasiteetti on korkea. Erityisesti vedellä tiedetään olevan korkea ominaislämpökapasiteetti, 4180 J/(K kg), mutta huonona puolena on sen alhainen kiehumispiste, 100 °C:tta, joka on huomattavasti pienempi kuin esimerkiksi nestemäisillä metalleilla, joita lämpötilaerovarastointiin käytetään. Tämän vuoksi veden käyttö lämmityksessä rajautuu alle 100 celsiusasteen ellei ympäristön painetta kasvateta. Useimpien lämpötilaerovarastoinnissa käytettävien materiaalien lämpökapasiteetti rajoittuu alueelle 900 – 3000 J/ (K kg). [1] Näitä materiaaleja käsitellään kappaleissa 3.1.1. ja 3.1.2. tarkemmin.

Lämpötilaerovarastointiin ei usein liity väliaineen faasimuutoksia, kun lämpötila nousee. Muita nesteitä joihin lämpöä kyetään lämpötilaerovarastoinnilla keräämään ovat mineraaliöljyt, sulatetut suolat ja nestemäiset metallit sekä näiden aineiden seokset. Kiinteisiin ja yleisesti käytettyihin varastointimateriaaleihin kuuluvat muun muassa kivi, betoni, hiekka ja tiili. [3]

### 3.1.1 Nestemäiset lämpötilaerovarastoinnissa käytettävät materiaalit

Nestemäisten varastointimateriaalien hyvänä puolena pidetään sitä, että niitä kyetään helposti kierrättämään systeemissä sitä mukaa, kun halutaan joko varastoida lämpöä tai vapauttaa sitä ympäristöön. Systeemiä, jossa neste kiertää prosessissa, kutsutaan aktiiviseksi systeemiksi. [3] Passiiviseksi systeemiksi kutsutaan menetelmää, jossa neste tai muu lämmönsiirtomateriaali ei liiku fyysisesti prosessin mukana. [5] Nesteiden hyväksi puoleksi lasketaan myös niiden tiheyden muutos lämpötilan muuttuessa. Nesteessä vallitsevien tiheyserojen avulla pystytään luomaan materiaaliin lämpögradientti, jonka seurauksena lämmin neste virtaa ylöspäin ja viileämpi alaspäin. Lämpögradientin avulla saadaan siis eroteltua viileämpi neste lämpimästä. [6] Nestemäisiä väliaineita hyödynnetään erityisesti aurinkotorneissa ja parabolisissa keräimissä. [5]

Nestemäiset väliaineet ovat paljon tutkittuja ja myös paljon käytettyjä lämpötilaerovarastoinnissa. Monien nestemäisten väliaineiden haittapuolen tiedetään olevan niiden kyky varastoida merkittävä määrä energiaa vain suuriin määriin väliainetta. Nämä mainitut haittapuolet voivatkin nostaa merkittävästi lämpötilaerovarastoinnin aiheuttamia kustannuksia. Taulukosta 1 voidaan lukea tyypillisimpien lämpötilaerovarastointiin käytettävien materiaalien, niin nesteiden kuin kiinteidenkin aineiden, ominaisuuksia. [5]

**Taulukko 1** Lämpötilaerovarastoinnissa käytettävien kiinteiden ja nestemäisten materiaalien tarkasteltavia ominaisuuksia. [3, 7]

Varastointimateriaali	Lämpötila		Keskimääräinen tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Keskimääräinen lämmönjohtavuus (W/mK)	Keskimääräinen lämpökapasiteetti (kJ/kg K)
	Kylmä (°C)	Kuuma (°C)			
Hiekka-kivi-mineraaliöljyseos	200	300	1700	1	1.3
Lujitettu betoni	200	400	2200	1.5	0.85
NaCl	200	500	2160	7	0.85
Valurauta	200	400	7200	37	0.56
Mineraaliöljy	200	300	770	0.12	2.6
Silikoniöljy	300	400	900	0.1	2.1
Nitriittisuola	250	450	1870	0.57	1.5
Vesi	25	90	1000	0.6	4.2

Taulukon 1 perusteella voidaankin huomata, että on haasteellista löytää materiaali, joka vastaisi kaikkia kappaleessa 2.1.1. mainittuja ominaisuuksia. Esimerkiksi valuraudalla

tiedetään olevan suuri tiheys sekä lämmönjohtavuus, mikä on tavoitteellista, mutta sen keskimääräinen lämpökapasiteetti ei ole yhtä hyvä, eli suuri, kuin hiekka-kivi-mineraaliöljyseoksella. Maksimaalisen varastopotentialin saavuttamiseksi onkin tärkeää ottaa materiaalin valinnassa huomioon prosessi ja systeemi, jossa varastointimateriaalia tullaan hyödyntämään.

Suosittuihin ja yleisiin kiinteisiin varastointimateriaaleihin kuuluvat vesi, mineraaliöljyt, sulasuolat ja nestemäiset metallit sekä niiden seokset. Veden ominaisuuksia varastointi- ja lämmönsiirtomateriaalina sivuttiin jo kappaleessa 3.1. **Vettä** hyödynnetään useimmiten vettä varastoivissa eristetyissä tankeissa. Lämmitettyä tankissa, vesi voidaan johtaa rakennuksiin lämmittämään ympäristön ilmaa tai vastaavasti lämmittämään vettä. [3]

**Mineraaliöljyjä** käytetään termisen energian varastoinnissa lämmönsiirtonesteinä keskitetyissä aurinkovoimaloissa. Mineraaliöljy kerää lämmön aurinkokeräimestä ja tämän jälkeen kuljettaa sen kattilaan, jossa lämmön avulla kehitetään höyryä turbiinien pyörittämiseksi. Mineraaliöljyä voidaan käyttää lämmönsiirtonesteen lisäksi myös varastointimateriaalina. Kun aine toimii molempina samassa systeemissä, voidaan sitä kutsua suoraksi systeemiksi. Suoran systeemin etuja ovat sen pienemmät kulut verrattuna kahden materiaalin tai aineen systeemiin. Mineraaliöljyn muihin etuihin kuuluvat sen alhaisempi kaasunpaine, kuin esimerkiksi mitä vedellä on, ja tämän ansiosta sitä voidaan hyödyntää myös korkeampien lämpötilojen eli yli 200 °C:en varastointimenetelmissä. Sulasuoloihin verrattuna mineraaliöljyjen hyviin puoliin kuuluu sen jäätymättömyys alhaisemmissa lämpötiloissa. Kuitenkin toisin kuin sulasuolat, sen synnyttämät kustannukset ovat korkeammat, mikä on johtanut tilanteeseen, jossa alhaisten jähmettymispisteiden sulasuolat ovat syrjäyttäneet osan käytettävistä mineraaliöljyistä. [3]

**Sulasuola** oli vuonna 2017 eniten käytetty aine termisen energian varastoinnissa keskitetyissä aurinkovoimaloissa. Ne ovat edullisia, erityisesti nitraatit, niiden tiheys on suuri verrattuna muihin nestemäisiin varastointimateriaaleihin ja niiden kaasunpaine on alhainen, joka mahdollistaa niiden käytön myös korkeissa 400 celsiusaseen lämpötiloissa. Prosessin toimiminen korkeissa lämpötiloissa parantaa Rankine-prosessin tehokkuutta. [3] Sulasuolojen korkea jähmettymispiste kuitenkin hankaloittaa niiden käyttöä, sillä usein aineen hyödyntämiseksi tarvitsee systeemeissä käyttää erikseen erilaisia jähmettymisenestokeinoja. [6]

### 3.1.2 Kiinteät lämpötilaerovarastoinnissa käytettävät materiaalit

Lämpötilaerovarastoinnin väliaineina on erityisesti tutkittu sekä betonia että keraamia. Syitä tähän ovat molempien materiaalien edullisuus ja hyvät lämmönjohtavuudet, vaikka kummankin ominaislämpökapasiteetit ovatkin melko maltillisia. Taulukosta 1 voidaan

lukea kiinteiden lämpötilaerovarastointiin käytettävien materiaalien ominaisuuksia tarkemmin. [3, 5] Kiinteiden varastointimateriaalien hyviin puoliin lukeutuu se, että kaasunpaine ei ole ongelma materiaaleja käytettäessä. Kiinteitä materiaaleja ei voida kuitenkaan kierrättää samaan tapaan kuin nestemäisiä, joten prosessi vaatii aina myös lämmönsiirtonesteen, mikä tekee siitä passiivisen systeemin. Lämmönsiirtonesteenä/-aineena toimii useissa tapauksissa ilma. Kiinteät lämpötilaerovarastoinnissa käytettävät materiaalit ovat eniten käytettyjä kotitalouksien lämmityksessä sekä teollisuuden hukkalämmön palauttamisessa, sillä ne ovat molemmat alhaisten lämpötilojen prosesseja. [3]

**Kivi** on yleinen varastointimateriaali, kun se murskataan pienempiin osiin, noin 5cm palasiin ja sekoitetaan yhdessä hiekan sekä mineraaliöljyn kanssa. Seosta voidaan säilöä löyhästi putkiin, joissa ilma mahtuu lämmönsiirtoaineena kulkemaan materiaaliseoksen välistä pienemmistä raoista. Kiven huonoihin puoliin kuuluu sen huono lämmönjohtavuus, mutta positiivisena pidetään sen myrkyttömyyttä ja edullisuutta. [3, 8] Kiven ja erityisesti kvartsiittikiven käyttöä lämpötilaerovarastoinnissa käydään läpi tarkemmin kappaleessa 3.4.3.

**Betoni** kuuluu helposti hyödynnettäviin varastointimateriaaleihin, sillä sen mekaanisen vahvuuden ansiosta se ei vaadi erillistä pidikettä ympärilleen pitämään ainetta kasassa. [3] **Hiekkaa, soraa tai piioksidia** on usein paikallisesti saatavilla, mikä tekee niistä suosittuja lämmön varastointimateriaaleja. Kun sora ja piioksidi rouhitetaan pienempiin osiin, noin 0.2-0.5 mm kokoisiksi palasiksi, voidaan aineita hyödyntää varastointisysteemissä yhdessä esimerkiksi ilman kanssa, joka toimii prosessissa lämmönsiirtonesteenä. Muun muassa hiekkaa voidaan hyödyntää systeemeissä, joissa hiekka sijoitetaan aurinkokeräimeen. Aurinkokeräimessä hiekka voi lämmetä jopa 700-1000 °C:een lämpöiseksi, jota hyödynnetään syntyvän höyryn avulla Rankine-kiertoprosessin kierrättämiseksi. [9]

**Tiili ja tiiliskivet** ovat suosittuja lämmönvarastointimateriaaleja rakennuksissa minimoimaan tilan lämmityskustannuksia [7]. Tiiltä voidaan lämmittää kulutushuipun ulkopuolisena aikana, yöllä edullisemman sähkön kautta tai päivällä luonnollisen konvektion tai säteilyn avulla ilmasta. Tämä mahdollistaa rakennuksien lämmittämisen ilman sähkön kulutusta tuntien aikana, jolloin energian kulutus on suurinta. [3]

### 3.2 Lämpötilaerovarastointi matalissa lämpötiloissa

Matalissa lämpötiloissa, alle 200 °C:ssa, lämpötilaerovarastointi muodostuu useimmiten aurinkoenergialla toimivista lämminvesivaraajista, joita hyödynnetään niin yksittäisten kotitalouksien kuin suurempien alueidenkin lämmityksessä. Termisen energian varastointisysteemit koskien aurinkoenergian keräämistä ovat usein suhteellisen monimutkaisia ja menetelmät ovat kalliita. Lämmönvarastointitankkien sijoituspaikka tulee valita tarkkojen vaatimusten mukaan ja tämän lisäksi tankit vaativat teknistä huoltoa. [1]

Geotermissillä lämpövarastosysteemeillä on mahdollisuus massiiviseen lämpöenergian varastointiin matalimmissa lämpötiloissa eli alle 200 °C:ssa. Riippuen maanalaisista olosuhteista, joka muodostuu paikallisen emäkallion, saven ja soran mukaan, sekä pohjaveden korkeudesta/syvyydestä maastossa, geoterminen lämpövarastointisysteemi voi koostua porausreikärykelmistä, joiden syvyys vaihtelee muutamista kymmenistä metreistä jopa sataan metriin. [1] Geoterminen lämpövarastointi voi sisältää lämpöpumppuja riippuen lämpövaraston lämpötilatasosta. [1, 10]

### 3.3 Lämpötilaerovarastointi korkeissa lämpötiloissa

Korkeissa lämpötiloissa termistä energiaa voidaan varastoida lämpötilaerovarastoinnilla aktiivisilla ja passiivisilla systeemeillä. Aktiivinen varastointisysteemi koostuu usein kahdesta tankista, joista yksi säiliöi varastointiin käytettävää väliainetta kylmimmillään ja toinen kuumimmillaan. Aktiiviselle systeemille ominaista on se, että itse varastointimateriaali kiertää systeemissä samaan aikaan, kun se varastoi itseensä lämpöä. [3] Varastointiin käytettävä väliaine on neste, jonka lämpötila vaihtelee sille ominaisen lämpötilasteikon välillä. Tätä varastoinnissa käytettävää väliainetta kutsutaan myös lämmönsiirtonesteeksi, josta puhuttiin kappaleessa 2.1. Lämmönsiirtoneste virtaa systeemissä lämpöenergian latautumisen ja purkautumisen mukaan. [1]

Passiivisessa lämpötilaerovarastoinnissa systeemi vastaa regenerointia. Passiivisen systeemin tapauksessa lämmönsiirtoneste kiertää varastointiin käytettävän väliaineen läpi ja itse varastointimateriaali pysyy systeemissä paikallaan. [3] Varastointiin käytettävä materiaali voi koostua kiinteästä materiaalista kuten kivistä, hiekasta, betonista, keraameista tai kierrätetystä jätteistä peräisin olevasta materiaalista. Kun lämmönsiirtonesteen lämpökapasiteetti on huomattava, se edistää koko varastointikapasiteettia ja systeemiä voi kutsua duaaliseksi väliainesysteemiksi. Tämä teknologia perustuu lämpöharppauskerrosperiaatteeseen. Varastointimateriaali siis pysyy paikallaan, kun lämmönsiirtoneste kiertää systeemissä ladataan ja purkaen energiaa prosessin etenemisen mukaan. [1]

Edellä mainittuja teknologioita käytettäessä on seuraavat seikat huomioitava: systeemin energiatehokkuus, varastointimateriaalin saatavuus ja hinta, varastointimateriaalin ja lämmönsiirtonesteen yhteensopivuus systeemissä, systeemissä muodostuneen termisen

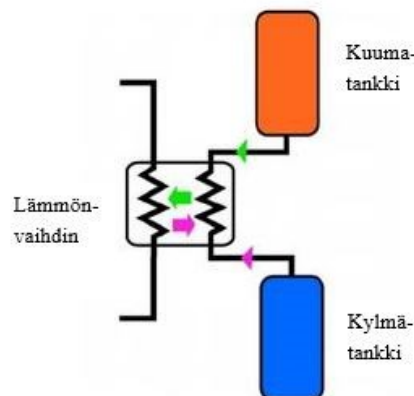
energian määrä, energian takaisinmaksuaika, pääomakustannukset, käyttöikäkustannukset, varastoidun energian aiheuttamat kustannukset ja ilmastoon sekä ympäristöön aiheutuneet kuormitukset kuten esimerkiksi kasvihuonekaasupäästöt. [1] Edulliset ja ympäristöystävälliset systeemit tarjoavat kestäviä vaihtoehtoja toimialalle. Jotta kansainvälisen energiajärjestön odotukset keskitetyn aurinkovoiman kehittämisestä voidaan täyttää, vaatii se suuria määriä varastointimateriaaleja. Tämän vuoksi kierrätetyt varastointiin käytettävät väliaineet ovatkin kiinnostava vaihtoehto sulatetuille suoloille, joiden saatavuutta rajoittaa niiden korkea hinta. Ensimmäisen tärkeää on huolehtia varastointimateriaalin ja lämmönsiirtonesteen yhteentoimivuudesta systeemikohtaisesti, jotta prosessi toimisi ideaalisella tavalla. [1]

### 3.4 Lämpötilaerovarastoinnin sovelluskohteita

Lämpötilaerovarastointisysteemeissä käytettävät materiaalit koostuvat lämpötilaerovarastointimateriaaleista, jotka mainittiin kappaleissa 3.1.1. ja 3.1.2. [3, 5] Seuraavaksi käydään tarkemmin läpi tyypillisimpiä lämpötilaerovarastoinnin sovelluskohteita.

#### 3.4.1 Kahden tankin välinen suora aktiivinen systeemi

Kahden tankin välisessä systeemissä varastointimateriaali toimii samaan aikaan myös lämmönsiirtonesteenä ja tämän ansiosta välitason lämmönsiirtäjää ei kyseisessä systeemissä tarvita. Tyypillisesti systeemissä hyödynnetään mineraaliöljyä, jota on varastoitu kahteen erilliseen tankkiin. Mineraaliöljyjen etuihin kuuluvat niiden alhaiset jähmettymispisteet. Toinen tankki, korkean lämpötilan tankki, on systeemissä lämpötilassa 307 °C ja kylmempi tankki lämpötilassa 240 °C. Systeemissä lämmennyt lämmönsiirtoneste virtaa kuumatankista kylmätankkiin vapauttaen energiaa muodostaen samalla kaasua. Kun lämpöenergia on vapautettu, viilentynyt lämmönsiirtoneste virtaa kylmätankkiin, jossa se päivän aikana lämpenee ja lämpenemisen johdosta virtaa jälleen takaisin kuumatankkiin. [3]

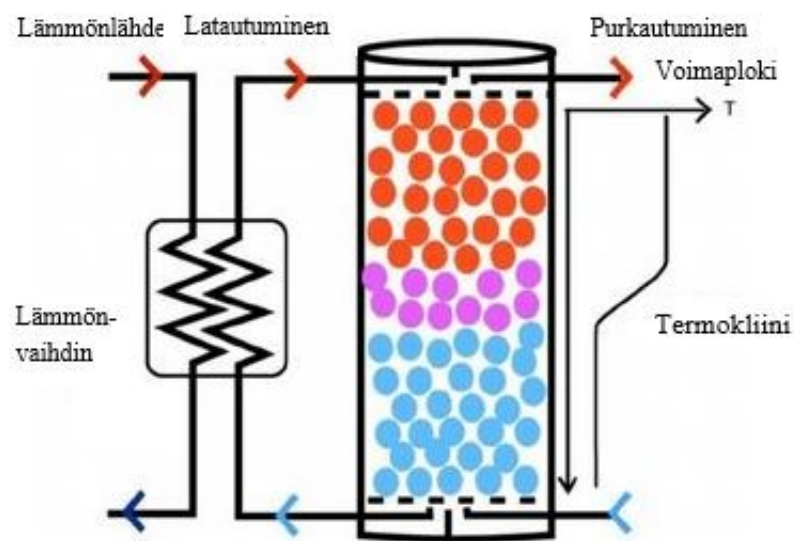


**Kuva 1** Kahden tankin välinen suora aktiivinen systeemi. [1]

Tämän tyyppisen kahden tankin välistä suoraa aktiivista systeemiä rajoittaa kuitenkin lämpötila, jossa lämmönsiirtoneste pystyy toimimaan. Systeemi ei sovellu korkeammille lämpötiloille lämmönsiirtonesteen eli tässä tapauksessa mineraaliöljyn korkean kaasupaineen takia. Ongelma pystytään kuitenkin ratkaisemaan osittain vaihtamalla lämmönsiirtonestettä. Esimerkiksi sulatetut suolat ovat ominaisuuksiltaan sopivia toimimaan samaan aikaan lämmönsiirtonesteenä kuin varastointimateriaalinakin ja soveltuvat käytettäväksi laajemmalla lämpötila-asteikolla, 200 – 600 °C. Sulatetut suolat mahdollistavat myös alhaisen kaasun paineen, ne omaavat korkean tiheyden ja maltillisen ominaislämmön, eivätkä ne reagoi helposti muiden aineiden kanssa. [3] Tämän tyyppistä suolasysteemiä hyödynnetään ainakin jo Italiassa, Sisilian saarella. Kyseisen varastointisysteemin varastointikapasiteetti voi saavuttaa jopa 100 MW vain kahdeksassa tunnissa. [6]

### 3.4.2 Yhden tankin termokliininen systeemi

Yhden tankin termokliinisessä systeemissä lämpötilagradientti luodaan varastoon/tankkiin kelluntailmiön avulla. Nosteilmiö mahdollistaa systeemissä olevien kahden aineen selkeän erottelun siten, kun lämmin neste virtaa pinnalle, painuu samalla viileämpi neste tankin pohjaan. Systeemiä, jossa koko termokliininen tankki on täytetty nestemäisellä varastointimateriaalilla, kutsutaan aktiiviseksi termokliiniseksi systeemiksi. [6]



**Kuva 2** Havainnollistava kuva yhden tankin termokliinisestä systeemistä. [1]

Aktiivinen yhden tankin termokliininen varastointisysteemi on kuitenkin jouduttu toteamaan kalliiksi, sillä siinä käytettävät nestemäiset varastointimateriaalit ovat hintavia. Kyseistä varastointimenetelmää voidaan kuitenkin muokata edullisemmaksi lisäämällä tankkiin valittua kiinteää täyteainetta, joka toimii systeemissä tällöin pääosaisena varastointimateriaalina. Termokliinistä tankkia, joka koostuu pääosin kiinteästä aineesta, jonka sekaan on lisätty lämmönsiirtonesteet, kutsutaan passiiviseksi systeemiksi. [6] Tyypillisesti

passiivisessa systeemissä nestemäinen aine on sulasuola ja kiinteänä aineena toimii kvartsiittikivi. Systeemissä sulasuola siis virtaa kvartsiittikivitäytteen läpi, jolloin lämpö pääsee purkautumaan eli siirtymään nesteestä varastointimateriaaliin eli kiveen. [11]

### 3.4.3 Passiivinen kiintokerrossysteemi

Passiivinen kiintokerrossysteemi perustuu väljästi kiinteällä materiaalilla pakattuun tiivistettyyn putkeen/tilaan, jossa lämmönsiirtoneste mahtuu kiertämään systeemin sekä kiinteän materiaalin läpi kuljettaen samalla lämpöä mukanaan. [12] Tämän tyyppinen varastointisysteemi soveltuu alhaisille lämpötiloille eli noin 100 °C:seen saakka [3]. Kiinteänä materiaalina systeemissä toimivat usein kvartsiitti kivi, piioksidi sekä hiekka, joilla valittu tila täytetään. Lämmönsiirtonesteinä, tai tässä tapauksessa kaasuna, toimii prosessissa usein aikaisemmin mainittu ilma. Prosessissa ilmaa lämmitetään aurinkopaneelien avulla, jonka jälkeen luonnollisin keinoin lähtee virtaamaan kivipedin läpi. Virratessaan kiintokerrossysteemin läpi, ilma viilenee siirtäessään lämpöä varastointimateriaaliin eli kvartsiitti kiveen, hiekkaan ja piioksidiin. Virratuaan systeemin läpi, ilma palaa takaisin aurinkopaneeleille lämpenemään uudelleen, mikä muodostaa prosessista kiertävän. [3, 12]

Aluksi ilman kierrettyä vain kerran systeemin läpi, on prosessi ehtinyt lämmittää vain alkuosan putkessa sijaitsevasta kivistä. Useiden kierrosten jälkeen, kun ilma on ehtinyt lämmittää koko systeemin ja lämpötila putkessa on lähes vakio kaikkialla, voidaan lämpöä alkaa purkaa ja päästää lämmitettävään ympäristöön sitä mukaa, kun lämmitystä tarvitaan. Kun ympäristöä aletaan systeemin avulla lämmittää, ilmavirta vaihtuu päinvas- taiseksi. Tällöin viileä ympäristön ilma pyrkii virtaamaan putkiston sisään, jossa se lämpenee kvartsiittikiveen varastoidun lämpöenergian avulla. Lämmitettyään, ilma virtaa takaisin viileään huoneilmaan, jossa se lämmittää ympäristöä samaan aikaan kun kivipeti vuorostaan viilenee. [3, 12]

Lämpöhäviöiden estämiseksi systeemi on usein hyvin eristetty ja putkisto on asennettu lähelle ilmaa lämmittäviä aurinkopaneeleita. Passiivisen kiintokerrosvarastointimenetelmän haittapuolena on kuitenkin sen toimimattomuus vakiolämpötiloissa. Systeemi tarvitsee siis vaihtuvuutta lämpötiloissa toimiakseen. Varastointimenetelmän toinen merkittävä haittapuoli on sen herkkyys lämpölaajenemiselle. Kun putkisto ja putkiston sisällä sijaitseva varastointimateriaali eivät laajene tai -kutistu samaan tahtiin lämpötilan muuttuessa, aiheuttaa se putkiston taipumista pitkällä aikavälillä. Prosessi siis ei itsessään kärsi lämpölaajenemisen aiheuttamista häiriöistä, mutta laitteisto, jolla prosessi mahdollistetaan, vaurioituu ajan mittaan, mitä enemmän se joutuu lämpölaajenemisen kohteeksi. [12]



### 3.4.4 Höyryakku

Höyryakkuja hyödyntävässä varastointisysteemissä vettä höyrystetään aurinkoenergialla. Ylimääräkaasu säilötään talteen hetkinä, kuten aamulla ennen kello kahtatoista ja iltapäivällä ennen ilta yhdeksää [2], kun energian tai lämmityksen tarve ei ole suuri. Vesihöyry säilötään höyryakkuihin suureen 100 bar paineeseen. Tässä paineessa höyry varastoituu nestemäiseen muotoon eli tiivistyy vedeksi. Höyryakkusysteemi on edullinen sekä yksinkertainen. Varastointimenetelmän haittapuoli on kuitenkin suuren kaasunpaineen aiheuttamat nousevat putkistokustannukset. Lisäksi prosessi vaatii erillisen suojaavan lämmitysjärjestelmän vedelle, jotta varastointiprosessi saadaan käynnistettyä. [13]

## 4. LATENTTILÄMMÖN VARASTOINTI

Latenttilämpövarastointi (*LHTES – latent heat thermal energy storage*) eli sitoutuneen lämmön varastointi on yksi tehokkaimmista menetelmistä varastoida auringon termistä energiaa [4, 14]. Latenttilämpövarasto käyttää hyödykseen materiaalin absorboimaa tai vapauttamaa energiaa, kun materiaalissa tapahtuu faasimuutos. Faasimuutos voi tapahtua joko kiinteästä nesteeseen tai nesteestä kaasuun. Latenttilämpöä varastoidaankin siis yleisimmin faasimuutosmateriaaleihin (*PCM – phase change material*). Latenttilämpövarastoinnin kehitys faasimuutosmateriaalien avulla on tällä hetkellä lupaavaa, sillä kyseiset materiaalit ovat kykeneviä varastoimaan suuria määriä energiaa pieneen määrään ainetta vakio lämpötilavälillä. Vaikka faasimuutos voi fysikaalisesti tapahtua aina kiinteästä kaasuun saakka, on vain muutosta kiinteästä nesteeseen hyödynnetty tällä hetkellä latenttilämpövarastoinnissa, sillä muutos nesteestä kaasuun vaatisi suuria määriä materiaalia sekä korkean paineen jotta prosessi pystyisi säilöä sitomaan varastoon suurempia määriä energiaa. [5]

Latenttilämmön varastointimateriaaleja kutsutaan faasimuutosmateriaaleiksi. Faasimuutosmateriaalit absorboivat lämpöenergiaa ”piilevästi” itseensä samalla, kun sulavat. Samalla kun energiaa absorboituu materiaaliin, tapahtuu väliaineessa faasimuutos, vaikka itse lämpötilan muutos saattaa olla hyvin pieni. [3] Terminen energia, joka sitoutuu faasimuutosmateriaaliin, voidaan kuvata kaavan (2) avulla

$$Q = m \int_{T_L}^{T_m} C_{ps} dT + m\Delta H_m + m \int_{T_m}^{T_H} C_{pl} dT, \quad (2)$$

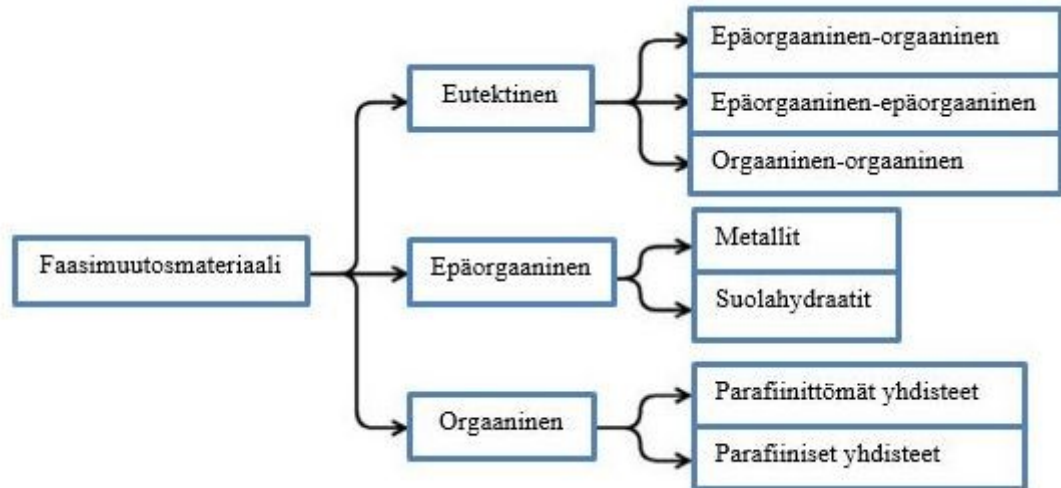
jossa  $T_m$  kuvaa faasimuutosmateriaalin sulamispistettä,  $C_{ps}$  ja  $C_{pl}$  ovat ominaislämpökapasiteetit kiinteälle ja nestemäiselle faasimuutosmateriaalille ja  $T_L$  ja  $T_H$  kuvaavat lämpötilamuutosta joka prosessissa tapahtuu. [5]

Latenttilämpövarastointia hyödynnetään suurimmaksi osaksi vain matalissa lämpötiloissa, alle 200 °C:ssa, sillä prosessi on tällöin tehokkain. Korkeissa lämpötiloissa aurinkoenergiaa varastoidaan talteen pääosin sähköän muodossa termodynaamisen syklin kautta. [5]

### 4.1 Faasimuutosmateriaalien luokittelu

Faasimuutosmateriaalit jaetaan tyypillisimmin lämpötilan ja sulamispisteen mukaan. Sulamispisteet voidaan jakaa kahteen kategoriaan, mataliin lämpötiloihin alle 200 °C ja sulamispisteisiin, jotka ovat yli 200 °C. Materiaalit luokitellaan useimmin orgaanisiin, epäorgaanisiin tai eutektisiin sidoksiin. Kuvassa 3 havainnollistetaan faasimuutosmateriaa-

lien luokittelua ja jaottelumenetelmiä. Eutektiset seokset voivat muodostua joko pelkään orgaanisten aineiden tai epäorgaanisten aineiden seoksista tai näiden kahden seoksesta. Epäorgaanisiin aineisiin kuuluvat metallit sekä suolahydraatit ja orgaanisiin aineisiin parafiinittömät sekä parafiiniset yhdisteet. [5]



**Kuva 3** Faasimuutosmateriaalien yleisin luokittelutapa. [5]

**Orgaaniset** materiaalit kykenevät toistuvasti jähmettymään ja sulamaan ilman materiaalissa tapahtuvaa erkautumista tai korroosiota [3, 5]. Orgaanisiin aineisiin kuuluvat parafiiniset ja parafiinittömät yhdisteet. Orgaanisia latenttilämpöenergiaaaleja on testattu sekä onnistuneesti saatu sovellettua kotitalouksien käyttöön sekä kaupalliseen toimintaan mukaan. Orgaanisten aineiden lämmönjohtavuus on kuitenkin alhainen, 0.1- 0.35 W/m K, minkä vuoksi niiden sovelluskohteissa materiaalia tarvitaan enemmän, jotta lämmönjohtavuuden kokonaiskapasiteetti prosessissa olisi hyvä. Lisäksi orgaanisten aineiden sulamispisteet ovat usein alhaisia, minkä takia orgaanisten aineiden soveltuvuutta korkeampiin lämpötiloihin ei olla vielä testattu. [3]

**Epäorgaaniset** materiaalit jaetaan tyypillisimmin kahteen eri luokkaan, suolahydraatteihin ja metalleihin. Suolahydraatit ovat sekoitus epäorgaanisista suoloista ja vedestä, jotka muodostavat tyypillisen kristallisen ja kiteisen kiinteän rakenteen. Tämän tyyppisiä materiaaleja käytetään paljon faasimuutosmateriaaleina, sillä ne kykenevät varastoimaan ja sitoman itseensä sulaessaan paljon energiaa, niiden lämmönjohtavuus on suhteellisen hyvä. Niissä tapahtuvat tilavuuden muutokset materiaalin sulaessa ovat myös melko pieniä. Epäorgaanisten materiaalien metallit omaavat usein alhaisen sulamispisteen ja ne ovat usein eutektisia seoksia. Vaikka metallit tarjoavat monia etuja, niitä ei vielä olla harkittu faasimuutosmateriaaleiksi niiden painavuutensa takia. [5]

Eutektiset materiaalit ovat seoksia, jotka koostuvat kahdesta tai useammasta aineesta. Seoksessa olevat aineet sulavat ja jähmettyvät yhteneväisesti muodostaen samalla kitey-

tyvän seoksen. Kiteytymisen ansiosta on vain pieni todennäköisyys, että aineet lohkeisivat toisistaan. Eutektinen seos voi koostua joko kahdesta orgaanisesta, kahdesta epäorgaanisesta aineesta tai molempien aineiden seoksesta. [5]

Matalien lämpötilojen faasimuutosmateriaalit ovat yleisimmin käytössä taloissa, joissa hukkalämpöä pyritään hyödyntämään talon lämmityksessä. Korkeiden lämpötilojen faasimuutosmateriaalit ovat käytössä enemmän aurinkovoimaloissa ja muissa korkeisiin lämpötiloihin soveltuviissa systeemeissä. [5]

## 4.2 Latenttilämmön varastointi matalissa lämpötiloissa

Matalammissa lämpötiloissa latenttilämpövarastointia hyödynnetään usein rakennusten lämmityksessä. Faasimuutosmateriaalien avulla ja lisäämällä niitä talon rakenteisiin, pystytään vaikuttamaan positiivisesti talon seinien lämpöhitauteen. Tämä on hyödyllinen tapa erityisesti tilasyistä ja kun perinteistä lämpötilaerovarastointia ei kyetä käyttämään. [1]

Aurinkoseinä, eli ilmanvaihdon tuloilmaa aurinkosäteilyllä lämmittävä rakennuksen julkisivu, mahdollistaa rakennuksen lämmityksen ilmaisella ja uusiutuvalla energialla. Ne pitävät yllä riittävää ympäristön lämpötilaa ja samalla aurinkoseinien avulla kyetään välttämään huonosta ilmanvaihdosta koituvat ongelmat, kuten rakenteiden homehtuminen, mikä on riski asukkaalle terveydelle ja rakenteiden kestävyydelle. Varastointiin käytettävät standardien mukaiset seinät on useimmin tehty betonista ja niissä varastoitua energiaa tällä hetkellä on säilötyä vain lämmön tuntuvana energiana. [1]

Faasimuutosmateriaaleja voidaan sijoittaa seiniin kasvattamaan seinän lämmön varastointipotentiaalia samassa varastointiin varatussa tilavuudessa. Esimerkiksi 2,5 cm levyinen suolahydraatti levy voi varastoida seinään yhtä paljon lämpöenergiaa, kuin 15 cm leveä betoniseinä kykenee. Kuten luvun neljä alussa mainittiin, on hydraattisuolojen käytössä rajoitteita, jotka tulee ottaa huomioon sijoittaessa niitä seinään. Ongelmaksi on koettu hydraattisuolojen segregatioilmiö, jossa neste-suola-seoksen osat erkautuvat toisistaan sulamis- ja jähmettymisprosessien aikana. Materiaalin lämpöhajoaminen voidaan kuitenkin välttää, jos huolehditaan tarkasti seinien ja faasimuutosmateriaalien suojaamisesta hyvin korkeilta lämpötiloilta. [1]

## 4.3 Latenttilämmön varastointi korkeissa ja keskikorkeissa lämpötiloissa

Tämän hetkisen tiedon mukaan ei korkeiden lämpötilojen latenttilämpövarastointia faasimuutosmateriaalien avulla olla otettu vielä kaupallisesti käyttöön, vaikka tutkimusta asiasta on tehty ja testimoduuleita rakennettu. Korkeiden lämpötilojen latenttilämpövarastointi ei ole kaupalliseen käyttöön vielä päässyt leviämään korkeiden kustannusten aiheuttamien ongelmien takia. [1]

Ongelmia joita korkeissa lämpötiloissa on havaittu faasimuutosmateriaalien kanssa ovat huono lämmönsiirtokyky, materiaalin yhteensopivuus säiliön kanssa sekä kasvavat kustannukset. Korkeissa lämpötiloissa faasimuutosmateriaalin valinnassa tulee ottaa huomioon materiaalin hinta, materiaalin ikääntymisominaisuudet ja materiaalin kyky toimia palautuvasti prosessissa. Hyvän korkean lämpötilan faasimuutosmateriaalin ominaisuuksiin siis olisi hyvä kuulua korkea latenttilämpö, suuri tiheys, edullisuus, alhainen toksisuus ja riski, stabiilius ajan kuluessa ja hidas jähmettyminen eli alhainen alijäähtyminen. [1]

Faasimuutosmateriaalin parantamiseksi systeemiin on testattu erilaisia keinoja. Materiaalin kestävyys lisäämiseksi ja erkautumisen välttämiseksi, voidaan ainetta sakeuttaa. On kuitenkin huomioitava, että sakeuttaja syrjäyttää osan faasimuutosmateriaalista, minkä takia sama volyymi varastointimateriaalia ei kykene varastoimaan termistä energiaa yhtä paljoa kuin varasto, joka koostuu vain puhtaasta faasimuutosmateriaalista. [1]

#### **4.4 Latenttilämpövarastoinnin sovelluskohteita**

Latenttilämmön varastointimenetelmiä on olemassa monia. Tärkeää on kuitenkin valita lämmön varastointimateriaali lämpötilojen vaihteluvälien mukaan. Säiliön, johon varastointimateriaali sijoitetaan, tulee olla tarkasti suunniteltu valitun materiaalin asettamien vaatimusten mukaan. Aineen sulamisaika on vahvasti riippuvainen säilön sijainnista, geometriasta, lämmönsiirtokyvystä sekä termisistä parametreista, mikä vaikuttaa suuresti latenttilämpövarastointimenetelmän toimivuuteen. Latenttilämpövaraston geometria on usein piippumainen eli varasto muistuttaa sylinteriä. Tämän tyyppisessä varastossa lämpöhukka on pienimmillään. [3] Seuraavissa luvuissa käydään läpi metodeja, joilla parannetaan latenttilämpövarastointimenetelmien lämmönsiirtokykyä.

##### **4.4.1 Faasimuutosmateriaalin kapselointi**

Lämmönsiirto systeemissä paranee, kun faasimuutosmateriaali sekä lämmönsiirtoneste pääsevät fyysiseen kosketukseen toistensa kanssa. Kapseloimalla faasimuutosmateriaali pieniin vaippoihin, pystytään nostattamaan aikaisemmin mainittua fyysisen kontaktin määrää kahden systeemin välillä. Fyysisen kontaktin lisäämisellä voidaan välttää tai ennaltaehkäistä faasimuutosmateriaalin segregaatiota sekä sakkautumista, ja menetelmä mahdollistaa suuremman suhteellisen lämmönsiirron tilavuusyksikköä kohden. [4, 3]

Faasimuutosmateriaalit voidaan pakata ja tiivistää koteloihin kuten esimerkiksi sylintereihin, tuubeihin, pusseihin tai harkkoihin. Kaupallisesti kyseisiä koteloita on jo saatavilla noin 75 mm:n halkaisijakoossa. Kapseloitu faasimuutosmateriaali sijoitetaan latenttilämpövarastossa tankin/varaston sisään siten, että lämmönsiirtoneste kykenee virtaamaan kapselien lomassa lämpöenergian latautumis- ja purkautumisprosessin mukaan. Matalien varastointimenetelmien sovelluskohteissa käytetään yleisimmin materiaaleina kapselointisysteemeissä ruostumatonta terästä ja polypropeenaa. Korkeissa lämpötiloissa hyödyn-

netään materiaaleina metalleja kuten ruostumatonta terästä, nikkeliä ja päällysteinä esimerkiksi kalsiumkarbonaattia sekä titaanioksidia. Korkeissa lämpötiloissa kapselimateriaalivalinta tulee tehdä huolellisesti, sillä monet faasimuutosmateriaalit ovat syövyttäviä perinteisille kapselimateriaaleille. [3]

#### **4.4.2 Lämpöputki**

Lämpöpiippujen lämmönsiirtokyky on korkea ja niitä voidaan lisätä esimerkiksi faasimuutosmateriaalien kuori- ja putkivarastoihin parantamaan latenttilämpövaraston suorituskyyä. Systemissä lämpöpiiput toimivat siis termisinä kanavina faasimuutosmateriaalin ja lämmönsiirtonesteen välillä. Lämpöpiippu on jaettu kahteen osaan, höyrystimen ja kondensaatiossaan. Kiertoaine piipun sisällä kiertää siis sektioiden välillä siirtäen lämpöä materiaalien välillä. [3]

#### **4.4.3 Faasimuutosmateriaaliin upotetut huokoiset matriisit**

Tässä varastointimateriaalissa työstetty rakennelma kuten esimerkiksi metallimatriisi kuten kuparimatriisi tai luonnollisesti huokoinen materiaali kuten esimerkiksi grafiitti ja metalliset vaahdot upotetaan faasimuutosmateriaalin lämmönsiirron parantamiseksi latenttilämpövarastossa. Menetelmän suorituskyy perustuu matriisin huokoisuuteen ja lämmönjohtavuuteen. [3] On tutkittu, että puhtaassa faasimuutosmateriaalissa sulaminen ei tapahdu tasaisesti läpi koko aineen. Huokoisilla matriiseilla ja materiaaleilla pystytäänkin erityisesti vaikuttamaan faasimuutosmateriaalin sulamiseen siten, että sulaminen olisi tasaista läpi koko aineen. Täten pohjan ja pinnan välille ei synny faasieroja, jotka hidastavat prosessia ja vaikuttavat sen suorituskyyyn negatiivisesti. [15]

#### **4.4.4 Rivat ja laajennetut pinnat**

Pidennettyjä pintoja kuten ripoja käytetään putkissa, joissa lämmönsiirtoneste virtaa latenttilämpövarastossa kompensoimassa faasimuutosmateriaalin huonoa lämmönjohtavuutta. Ripoja hyödynnetään erityisesti parantamaan systeemin lämmönsiirtoa korkeiden lämpötilojen, varastointimenetelmissä. Ripojen hyvänä puolena pidetään niiden edullisuutta verrattuna faasimuutosmateriaalien kapselointiin. Yleisimmät materiaalit, joita käytetään rivoissa tehostamaan lämmönsiirtoa, ovat teräs, grafiittilevy, kupari tai alumiini. Erityisesti grafiittilevyn etuja ovat sen hyvä lämmönjohtavuus, alhainen tiheys sekä hyvä syöpymisenkesto. Pienemmällä määrällä grafiittilevyä voidaan myös varmistaa sama lämmönsiirto, mitä suuremmalla määrällä terästä saadaan aikaiseksi, mikä tekee grafiittilevystä kustannustehokkaamman valinnan varastointisysteemiin. [16]

## 5. POHDINTA JA VERTAILU

Tutkimuksessa tehtiin katsaukset lämpötilaerovarastointiin sekä latenttilämpövarastointiin, niissä käytettäviin materiaaleihin, niiden sovelluskohteisiin ja käyttötapoihin eri lämpötila-asteikoilla. Tutkimuksessa sivuttiin myös varastointimenetelmien kustannuksia ja systeemien monimutkaisuuksia. Tässä luvussa vertaillaan kahta aikaisemmin mainittua termisen aurinkoenergian varastointimenetelmää ja pohditaan, mitkä menetelmät olisivat esimerkiksi Suomen kaltaisen valtion leveyspiireihin sopivimpia menetelmiä.

Vertailtaessa erilaisia energian varastointimenetelmiä, voidaan todeta termisen energian varastoinnin olevan yksi edullisimmista ja laajimmin käytetyistä energian varastointikeinoista. Eniten käytetty varastointimenetelmä on nykypäivänäkin vielä lämpötilaerovarastointi, jonka juuret juontavat jopa vuosisatojen taakse. Tutkimuksessa käsitelty latenttilämpövarastointi on uudempi varastointimenetelmä ja saanut alkunsa noin muutamia kymmeniä vuosia sitten. [1] Vaikka latenttilämpövarastointi on menetelmänä uudempi, on faasimuutosmateriaaleja hyödyntäviä lämpövarastointimenetelmiä olemassa jo monia.

Termisen energian varastoinnissa päätavoitteena on tällä hetkellä saada kustannukset laskemaan materiaali- ja toimintakustannusten osalta. Materiaalien tiedetäänkin olevan yksi suurimmista kulueristä lämpöenergian varastoinnissa. Kustannuksien kannalta on termisen energian varastoisessa tärkeintä valita materiaali, jonka ominaislämpökapasiteetti ja tiheys ovat suuret. Kun aineen tiheys on suuri, ei ainetta tarvita varastointiin tilavuu- dellisesti suuria määriä, mikä tarkoittaa pienempiä varastokokonaisuuksia. Mitä pienempi varasto on, sitä edullisempi se on usein myös toteuttaa. Myös alhainen lämmönjohtavuus nostattaa systeemin kokonaiskustannuksia, sillä usein huonosti lämpöä johtavien materiaalien kanssa täytyy käyttää prosessia tehostavia keinoja kuten varastointimateriaalin kapselointia. Termisen energian varastoinnissa tärkeää olisikin saavuttaa prosesseille mahdollisimman hyvät tehokertoimet. [3] Prosessin suorituskyvyn nostamiseksi on myös tärkeää huolehtia lämmönsiirtonesteen ja varastointimateriaalin yhteen toimivuudesta [5].

Lämpötilaerovarastointiin käytettävät materiaalit ovat yleisesti ottaen usein kaikista edullisimpia ja niiden ominaisuudet ovat parhaiten tutkittuja. Esimerkiksi hiekka, savi, kivi, tiili ja vesi lukeutuvat edullisimpien varastointimateriaalin joukkoon. [3] Samaan aikaan kuitenkin lämpötilaerovarastointimateriaalit omaavat alhaisimman varastointikapasiteetin, kun materiaaleja vertaillaan esimerkiksi faasimuutosmateriaaleihin, joita käytetään latenttilämpövarastoinnissa. Lämpötilaerovarastoinnissa käytettävien materiaalin yleisimmät kustannukset vaihtelevat useimmin 0.05 – 0.1 €/kg välillä, mikä tekee materiaaleista edullisempia kuin faasimuutosmateriaalit. [5] Erityisesti korkeiden lämpötilojen varastointimenetelmiä voidaan analysoida LCOE-laskentamenetelmän avulla (*LCOE - Levelized Cost of Energy*) [3].

Lämpötilaerovarastointimateriaalit johtavat useimmissa tapauksissa myös paremmin lämpöä kuin faasimuutosmateriaalit. Lämpötilaerovarastointimateriaalien huonoksi puoleksi lasketaankin niiden alhaiset lämpökapasiteetit, jotka vaihtelevat usein välillä 0.56 kJ/kg – 1.3 kJ/kg. Tämän vuoksi lämpötilaerovarastointimateriaaleja tarvitsee määrällisesti käyttää prosessissa enemmän, mikä tekee itse systeemistä myös kalliimman toteuttaa. [5]

Tutkimuksessa käsiteltyjen tietojen pohjalta tehtiin taulukko 2, josta voidaan lukea lämpötilaerovarastoinnin ja latenttilämpövarastoinnin ominaisuuksista ja vertailla niitä keskenään. Taulukko toimii myös yhteenvedona tutkimuksen aiheista.

**Taulukko 2** Termisen energian varastointimenetelmien vertailu taulukkomuodossa.

	Lämpötilaerovarastointi	Latenttilämpövarastointi
<b>Kustannukset</b>	Lämpötilaerovarastoinnissa kustannukset koostuvat usein materiaaleista ja niiden huonosta lämmön johtavuudesta. Kokonaisuudessaan kustannukset ovat kuitenkin usein alhaisemmat, kuin latenttilämpövarastoinnissa on. Materiaalien ongelmiana on myös usein huono varastointikapasiteetti, mikä nostattaa kuluja.	Latenttilämpövarastoinnissa lämpötilaerovarastoinnin tapaan syntyvät suurimmat kustannukset materiaaleista. Latenttilämpövarastoinnin on todettu kokonaiskustannuksiltaan kalliimmaksi menetelmäksi, kuin lämpötilaerovarastointi on.
<b>Käytettävyys useissa lämpötiloissa</b>	Lämpötilaerovarastointia voidaan soveltaa sekä korkeiden että matalien lämpötilojen varastointimenetelmiin.	Latenttilämpövarastointia hyödynnetään suurimmaksi osaksi vain matalissa lämpötiloissa, sillä korkeissa lämpötiloissa prosessit saavat vastaansa haasteita, joihin ei edullista ratkaisua vielä olla keksitty.
<b>Menetelmien kompleksisuus</b>	Lämpötilaerovarastointisysteemit voivat varioida erittäin kompleksisista systeemeistä erittäin yksinkertaisiin systeemeihin. Yksinkertaisimmillaan lämpötilaerovarastointi on veden tai kiven lämmittämistä aurinkoenergialla.	Tyypillisimmin latenttilämpövarastot ovat kompleksisia systeemeitä, jotka vaativat edistynyttä teknologiaa toimiakseen. Varastointimenetelmän kompleksisuuden vuoksi menetelmää alettiin tutkia vasta n. 20-30 vuotta sitten.
<b>Sovellusten määrä</b>	Lämpötilaerovarastoinnilla on monia sovelluskohteita, sillä se on tähän mennessä kaikista tutkituin lämmönvarastointimenetelmä.	Latenttilämpövarastoinnin sovelluskohteita on jo kehitetty paljon, mutta monet tutkimuksista ovat joko jumittuneet tai päätyneet umpikujaan systeemien nousevien kustannuksien vuoksi.
<b>Kaupallisuus</b>	Lämpötilaerovarastointi on kaupallistettu onnistuneesti ja menetelmä on ollut ihmiskunnan käytössä jo satoja vuosia. Lämpötilaerovarastointi onkin suosittu niin yksittäisissä kotitalouksissa kuin teollisuuden parissa käytettävistä lämmön varastointimenetelmistä.	Vasta matalien lämpötilojen latenttilämpövarastointimenetelmät on voitu kaupallistaa, sillä korkeiden lämpötilojen menetelmät ovat kalliita ja systeemeissä vastaan tulevat materiaalin lämmönvaihtelua kestävä rakenteen ja säilön sekä materiaalin yhteensopimattomuus lämpölaajenemisen kannalta.



Tutkitun aineiston pohjalta on vaikeaa sanoa, mikä varastointimenetelmä olisi erityisesti Suomen kaltaisiin leveyspiireihin sopivin systeemi, sillä menetelmän sopivuus ympäristöönsä riippuu runsaasti muustakin kuin pelkästä saatavilla olevasta auringonvalosta. Kustannuksiltaan lämpötilaerovarastointi olisi kaikkein sopivin, mutta kun otetaan huomioon vähäinen auringon säteilymäärä, tarvitaan energian talteen ottamiseksi kenties kehittyneempää teknologiaa kuin vain aurinkoenergialla lämpeneviä vesitankkeja. Kehittyneempää teknologiaa tarjoaisivat faasimuutosmateriaalit, mutta kuten aikaisemmin todettiin, ei niiden kaupallistaminen ole vielä yhtä edistynyt kuin lämpötilaerovarastoinnilla on. Suomen kylmän talven takia rakennusten lämmittämisessä tuleekin keskittyä rakennusmateriaalien valintaan. Pitkien auringottomien jaksojen vuoksi varastojen tulisi olla tarpeeksi suuria ja pitkäaikaiseen käyttöön sopivia, jotta ne kykenevät sitomaan tarpeeksi energiaa itseensä.

Vähäisestä auringon säteilymäärästä huolimatta Suomessa hyödynnetään jo jonkin verran termisen aurinkoenergian tuomia hyötyjä rakennuksissa. Suomalaisen cleantech-yrityksen **Heliostoragen** liiketoiminta perustuu termisen aurinkoenergian keräämiseen ilmakehästä. Yritys käyttää teknologiaa, jolla se kerää ylijäämälämpöenergiaa ympäristöstään ja säilöö sen talteen syvälle kallioperään noin 70 °C:seen kylmempiä ajanjaksoja varten. Kun talvi ja syksy koittavat, eikä aurinkoenergiaa ole saatavilla enää yhtä paljon, aletaan auringosta kerättyä termistä energiaa vapauttamaan rakennuksiin kiertovesipumpuilla. Systeemin etuna on sen päästöttömyys verrattuna esimerkiksi perinteisiin lämpöpumppuihin. Kiertovesipumppujen käyttökustannukset ovat myös pienemmät kuin lämpöpumppuilla, mikä tekee prosessin pyörittämisestä edullisempaa. [17]

## 6. YHTEENVETO

Uusiutuvien energiamuotojen hyödyntäminen on yhteiskunnassamme yhä suositumpaa fossiilisten polttoainelähteiden vähitellen ehtyessä. Aurinkoenergia on eräs yksinkertaisimmista energianlähteistämme ja kaikki energia, jota maapalloltamme löytyy, on alun perin lähtöisin aurinkokuntamme keskustähdessä. Kuitenkin aurinkoenergian hyödyntäminen arkikäyttöön on huomattu olevan haastavaa ja jopa monimutkaista, sillä aurinkoenergia ja sen tuoma lämpö eivät jakaudu tasan pallomme koko pinta-alalle. Vaikka aurinkoenergiaa on saatavilla enemmän kuin koko Maan väestö tarvitsisi, haasteeksi on todettu sen maksimaalisen potentiaalin hyödyntäminen.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää erilaisia menetelmiä termisen aurinkoenergian varastoinnille. Aihe oli laaja, ja jotta tutkimuksessa pystyttiin syventymään tutkimusaiheeseen perusteellisesti, tutkimuksen aihetta rajattiin kahden yleisimmän termisen energian varastointimenetelmän mukaan. Työssä päädyttiin käsittelemään lämpötilaerovarastointia sekä latenttilämpövarastointia eri näkökulmineen. Tutkimuksessa syvennettiin eri materiaaleihin, sovelluskohteisiin ja niiden soveltuvuutta eri lämpötiloihin.

Uusiutuvan energian ja erityisesti termisen aurinkoenergian hyödyntämistä energiantuotannossa pitäisi kasvattaa. Lämpötilaerovarastointi- ja latenttilämpövarastointimenetelmät tarjoavatkin toimivia ja tehokkaita ratkaisuja. Kuitenkin jotta systeemit saataisiin kannattaviksi, tulisi kustannusten laskea selvästi ennen kuin osaa sovelluksia voitaisiin lähteä levittämään suuremmalla volyymilla markkinoille. Termisen aurinkoenergian varastoinnin tutkimus otti suuria askelia, kun faasimuutosmateriaalien hyödyntämistä varastointimenetelmissä lähdettiin tutkimaan. Kuitenkin latenttilämpövarastoinnin osalta tutkimus on vielä osittain kesken. Edullisia ratkaisuja aurinkoenergian talteenottoon ei korkeissa lämpötiloissa olla vielä kehitetty tarpeeksi. Menetelmien hyötykäyttö on kohdannut korkeiden lämpötilojen aiheuttamia ongelmia kuten esimerkiksi lämpötilan aiheuttamaa korroosiota.

Tutkimuksen teko ja kirjallisuus katsaus osoittautui haastavammaksi, mitä itse tutkimuksen aihe antoi olettaa. Tietoa oli runsaasti ja sen läpi seulominen oli aikaa vievää ja osin myös haastavaa. Paljon tutkitun aiheen kääntöpuoleksi osoittautuikin valtava laadukkaan tiedon määrä. Kun tutkimuksen rajauksesta päätettiin, helpottui aineiston kerääminen, ja tutkimus alkoi sanonnankin mukaan edetä varmasti mutta silti hitaasti. Työstä muodostuikin omanlaisensa syventävä yleiskatsaus kahteen tunnetuimpaan termisen energian varastointimenetelmään, katsaus, joka täydentää jo aikaisemmin tehtyjä tutkimuksia aiheesta.

Tutkimuksessa olisi voitu syventyä aiheeseen enemmän, mutta rajoittavan kandidaatin-työpituuden takia työ päätettiin rajata vain kahden yleisimmän varastointimenetelmän

mukaan. Jatkotutkimuksia aiheesta on mahdollista tehdä, ja tieteellisiä artikkeleita aiheesta onkin jo runsaasti saatavilla. Jatkotutkimuksissa menetelmien soveltuvuutta voitaisiin kenties pohtia aikavälien näkökulmasta, sillä kaikki termisen aurinkoenergian varastointimenetelmät eivät sovellu kaikille aikaväleille. Tutkittavia aikavälejä voisivat olla lyhyen ja pitkien aikavälien lämpövarastot. Lisäksi tutkimusta voitaisiin jatkaa perehtymällä lisää muihin varastointitekniikoihin kuten lämpökemialliseen varastointimenetelmään ja absorptiolämmön varastointiin. Työssä ei myöskään käyty läpi menetelmien aiheuttamia negatiivisia ympäristövaikutuksia ja päästöjä, jotka molemmat vaikuttavat suuressi prosessien kannattavuuteen.

Tämän tutkimuksen perusteella voidaan päätellä termisen aurinkoenergian varastointimenetelmien tutkimuksen olevan pitkällä, mutta suomalaista osaamista sekä tutkimusta aiheesta olisi hyvä yhä kehittää. Vaikka valtione sijaitsemme pallon pohjoisimmissa nurkissa, on suomalaisen ihmisen hiilijalanjälki perinteisesti yksiä suurimmista juurikin lämmitysten aiheuttamien kustannusten takia. Tämän vuoksi olisin erityisen tärkeää, että varastointimenetelmiä rakennusten lämmittämisessä hyödynnettäisiin ahkerammin. Tutkimuksen perusteella voidaankin siis todeta, että myös Suomen kaltaisille pohjoisille leveyspiireille on kehitetty sopivia varastointimenetelmiä. Ainoastaan ratkaisua vaille on enää jäljellä vain kustannusten minimointi, jotta systeemit saataisiin kaikin puolin kannattaviksi.

## LÄHDELUETTELO

- [1] B. Stutz, N. Le Pierres, F. Kuznik, K. Johannes, E. Palomo Del Barrio, J. Bédécarrats, S. Gibout, P. Marty, L. Zalewski, J. Soto, N. Mazet, R. Olives, J. Bezian and D. Minh, "Storage of thermal solar energy," *Comptes Rendus Physique*, vol. 18, pp. 401-414, 2017.
- [2] Y. Hou, R. Vidu and P. Stroeve, "SOLAR Energy Storage Methods," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 50, pp. 8954-8964, 2011.
- [3] G. Alva, L. Liu, X. Huang and G. Fang, "Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications," *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*, vol. 68, pp. 693-706, 2017.
- [4] K. Pielichowska and K. Pielichowski, "Phase change materials for thermal energy storage," *PROGRESS IN MATERIALS SCIENCE*, vol. 65, pp. 67-123, 2014.
- [5] H. Zhang, J. Baeyens, G. Cáceres, J. Degreè and Y. Lv, "Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 53, pp. 1-40, 2016.
- [6] A. Gil, M. Medrano, I. Martonell, A. La'zaro, P. Dolado, B. Zalba and L. Cabeza, "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation, part 1 concepts, materials and modellization.," *Renew Sustain Energy Rev*, vol. 14, pp. 31-55, 2010.
- [7] S. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, part 1: heat storage materials and techniques," *Energy Converts Manag*, vol. 39, pp. 1127-1138, 1998.
- [8] M. Hänchen, S. Brückner and A. Steinfield, "High-temperature thermal storage using a packed bed of rocks - Heat transfer analysis and experimental validation," *Appl Therm Eng*, vol. 31, pp. 2118-2132, 2011.
- [9] D. Schlipf, P. Schicktanz, H. Maier and G. Schneider, "Using sand and other small grained materials as heat storage medium in packed bed HTTESS," *Energy Procedia*, vol. 69, pp. 1029-1038, 2015.

- [10] L. Gao, J. Zhao and Z. Tang, "A review on borehole seasonal solar thermal energy storage," *Energy Procedia* 70, vol. 70, pp. 209-218, 2015.
- [11] Z. Yang and S. Garimella, "Molten-salt thermal energy storage in thermoclines under different environmental boundary conditions," *Appl Energy*, vol. 87, pp. 3322-9, 2010.
- [12] H. Singh, R. Saini and J. Saini, "A review on packed bed solar energy storage systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 1059-1069, 2010.
- [13] M. Medrano, A. Gil, I. Martonell, X. Potau and L. Cabeza, "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. part 2-case studies," *Renew Sustain Energy Rev*, vol. 14, pp. 56-72, 2010.
- [14] R. Alanen, T. Koljonen , S. Hukari and P. Saari, "Energian varastoinnin nykytila," *VTT Tiedotteita* 2199, pp. 1-169, 2003.
- [15] S. Krishnan, J. Murthy and S. Garimella , "A two temperature model for solid liquid phase change in metal foams," *Journal of Heat Transfer*, vol. 127, pp. 995-1004, 2005.
- [16] B. Cárdenas and N. León , "High temperature latent heat thermal energy storage: phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 724-737, 2013.
- [17] Heliostorage, "Heliostorage," 2017. [Online]. Available: <http://heliostorage.com>. [Accessed 29 05 2018].